DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260324001
引用格式: 赵晨曦, 陈锐, 任贝贝, 等. 2025 年河北省食用藻类中 27 种元素及无机砷污染状况调查及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 301–311.
Zhao Chenxi, Chen Rui, Ren Beibei, et al. Investigation and health risk assessment of 27 kinds of elements and inorganic arsenic pollution in edible algae from Hebei Province in 2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): xxx–xxx. (in Chinese with English abstract).

2025 年河北省食用藻类中 27 种元素及无机砷污染状况调查及健康风险评估

赵晨曦, 陈　锐, 任贝贝, 高月星, 陈福尊*
(河北省疾病预防控制中心, 石家庄　050021)

摘　要: 目的　对河北省市售藻类及其制品中 27 种元素及无机砷的污染状况进行调查分析并开展风险暴露评估。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)及液相色谱-串联电感耦合等离子体质谱法(high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry, HPLC-ICP-MS)对河北省市售 50 份藻类及其制品进行多元素和无机砷检测, 对检测结果进行统计分析, 结合内梅罗污染指数法、目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)、综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)、致癌风险指数法(carcinogenic risk, CR)、暴露量评估及消费建议等国际通用评估方法, 开展健康风险评估。**结果**　27 种元素及无机砷均有检出, 其中 22 种元素全部检出, 并且铅超标率为 14.6%。单因子污染指数最高为紫菜中 Cr, 达到 1.880, 轻度污染。13 种元素中, 除 As 外各元素的 THQ 均远小于 1, 从 TTHQ 来看, 3 种干制藻类由高到低依次为紫菜>裙带菜>海带, 并且 TTHQ 均小于 1, 表明对人体健康无显著影响。**结论**　50 份藻类及其制品污染情况相对比较安全, 但综合污染指数紫菜最高达到轻度污染, 除 As 外 THQ 与 TTHQ 均小于 1, 表明长期摄入对人体没有潜在健康风险。

关键词: 多元素; 无机砷; 藻类及其制品; 电感耦合等离子体质谱法; 暴露评估; 目标危害系数法
中图分类号: R155.5　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)14–0301–11

Investigation and health risk assessment of 27 kinds of elements and inorganic arsenic pollution in edible algae from Hebei Province in 2025

ZHAO Chen-Xi, CHEN Rui, REN Bei-Bei, GAO Yue-Xing, CHEN Fu-Zun*
(*Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Shijiazhuang* 050021, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate and analyze the contamination status of 27 kinds of elements and inorganic arsenic in seaweed and their products from markets in Hebei Province, and conduct risk exposure assessment. **Methods** nductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and high performance liquid chromatography-ICP-MS

收稿日期: 2026-03-24
第一作者: 赵晨曦(1987—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 309468405@qq.com
***通信作者:** 陈福尊(1969—), 女, 硕士, 主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: chenfuzun@126.com

(HPLC-ICP-MS) were employed to detect multiple elements and inorganic arsenic in 50 samples of seaweed and their products from markets in Hebei Province. Statistical analysis was performed on the detection results. Health risk assessment was conducted using internationally recognized evaluation indicators, including the Nemerow pollution index method, target hazard quotient (THQ), total target hazard quotient (TTHQ), carcinogenic risk (CR), exposure assessment and consumption recommendations. **Results** All 27 kinds of elements and inorganic arsenic were detected, with 22 kinds of elements being fully detected. The lead exceedance rate was 14.6%. The highest single-factor pollution index of nori was Cr (at 1.88), indicating mild pollution. Among the 13 kinds of elements, the THQ of all elements except As was significantly less than 1. The TTHQ of 3 kinds of dried algae species ranked from highest to lowest as porphyra>wakame>kombu, and were all less than 1, indicating no significant adverse impact on human health. **Conclusion** The pollution status of 50 algal samples and their products is relatively safe. However, the comprehensive pollution index of Porphyra reached a mild pollution level. Except for As, both THQ and TTHQ were less than 1, indicating that long-term intake poses no potential health risks to humans.

KEY WORDS: multi-element; inorganic arsenic; algae and their products; inductively coupled plasma mass spectrometry; exposure assessment; target hazard coefficient method

0 引 言

藻类作为一类分布广泛、营养价值丰富的生物资源, 不仅是海洋生态系统的重要组成部分, 更是人类膳食结构中的重要补充。其富含优质蛋白质, 部分藻类蛋白质含量可达干重的 60%~70%, 氨基酸组成接近人体需求, 并且含有丰富的膳食纤维、维生素、Omega-3 不饱和脂肪酸及多种矿物质[1–2], 在食品加工、保健品开发等领域的应用日益广泛。与此同时, 随着工业化进程加快与人类活动强度提升, 海洋、淡水等藻类生长环境受到重金属、持久性污染物等的持续影响。重金属是比较典型的累积性污染物, 具有显著的生物毒性和持久性, 易积累、富集, 最终通过食物链富集对人体产生伤害[3], 并且藻类因细胞壁富含羟基、羧基等活性官能团进行生物吸附和生物累积, 因此具有较强的吸附与富集能力[4–5], 藻类中元素组成和含量水平, 直接关联到产品食用安全, 与消费者的健康密切相关。

目前, 国内外针对藻类及其制品的质量研究多聚焦于单一元素或少数几类污染物的检测[6–7], 程雪华等[8]采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对紫菜中的硒进行检测分析, 杨玉凤等[9]对日照市市售海带中铅、镉、汞、砷、无机砷污染进行测定及监测分析, 对于多元素的全面筛查与协同风险评估相对不足。部分国家和地区虽已制定藻类中特定元素的限量标准, 但由于藻类种类繁多、生长环境差异较大, 现有标准难以全面覆盖各类产品。我国作为藻类生产与消费大国, 藻类产品的卫生限量规范有限, GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中仅对铅有规定限值, 大部分元素还没有明确限量, 相关监管与风险评估工作缺乏统一、科学的依据。

基于此, 本研究以常见食用藻类及其制品为研究对象, 系统分析其中 27 种元素及无机砷的含量分布特征, 结合内梅罗污染指数法、目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)、综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)、致癌风险指数法(carcinogenic risk, CR)、暴露量评估及消费建议等国际通用评估指标[10–12], 开展健康风险评估, 旨在明确藻类及其制品中多元素的暴露水平与潜在风险, 为藻类产品质量安全标准的制定提供技术支撑, 同时为消费者合理食用藻类产品、公众膳食结构的科学指导提供坚实的科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪、Thermo Dionex Ionpac As7 阴离子交换色谱柱(250 mm×4 mm, 10 μm)(美国赛默飞世尔科技公司); U3000-iCAP Q 液相色谱-串联电感耦合等离子体质谱仪、5000CN 微波消解仪(奥地利安东帕商贸有限公司); GM20 高效搅碎混匀机(德国 Retsch 公司); BHW-09A45 赶酸仪(上海博通化学科技有限公司); BAS2223S 千分之一天平(德国赛多利斯公司); 电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); 3-30K 离心机(德国 Sigma 公司); Hamilton PRP-X100 预处理柱(20 mm×2.1 mm, 10 μm)(瑞士哈美顿博纳图斯股份公司)。

硝酸(纯度 65%, 分析纯, 德国默克公司); 多元素标液(GNM-M259904-2013, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 汞元素标液 [GBW(E)084892]、碘酸钾 [GBW(E)086558]、亚砷酸根 (GBW08666)、砷酸根 (GBW08667)、一甲基砷 (GBW08668)、二甲基砷 (GBW08669)、砷甜菜碱 (GBW08670)、砷胆碱 (GBW08671)(中国计量科学研究院); 混合内标

(S240619032, 铂金埃尔默股份有限公司); 25%四甲基氢氧化铵(tetramethylammonium hydroxide, TMAH)(山东科源生化有限公司); 异丙醇(色谱纯, 北京迪马科技有限公司); 过氧化氢(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 磷酸氢二铵(分析纯, 天津市永大化学试剂有限公司); 甲醇(色谱纯, 德国默克公司); 高纯水(屈臣氏有限公司)。

1.2　样品采集与分类

河北省 11 个地级市及周边县区的农贸市场、超市或商店随机抽取 50 份藻类及其制品, 种类为紫菜, 海带, 裙带菜 3 大类。

1.3　样品前处理

1.3.1　样品制备

干制藻类(除干海带)取可食用部分, 用高效搅碎混匀机粉碎并混合均匀, 装入洁净聚丙烯塑料袋中, 密封保存备用; 干海带样品剪成小块, 放入烘箱中, 85 ℃烘干 4 h 后用高效搅碎混匀机粉碎并混合均匀, 储存于洁净的聚丙烯塑料袋中, 置于干燥器中保存备用, 同时应于烘干前后称重计算失水率。湿海带、湿裙带菜样品, 用蒸馏水洗净, 晾干表面水分, 用高效搅碎混匀机制成均质匀浆, 放入洁净的聚丙烯塑料袋中, 密封保存备用。

1.3.2　多元素前处理

混匀样品 1~2 g 于干燥微波消解管内, 加入 7 mL 硝酸, 静置过夜, 进行预消化。次日, 进行微波消解, 消解程序见表 1, 消解完全后取出, 放入赶酸仪中, 在 90 ℃条件下赶酸 1 h, 置于室温, 用蒸馏水定容至 25 mL, 备用。

1.3.3　碘元素测定前处理

干海带称取 0.1~0.2 g, 干紫菜、干裙带菜称取 0.2~0.5 g, 湿样称取 0.5~1.0 g, 置于 50 mL 的塑料离心管中, 加入 5 mL 提取液(5% TMAH), 涡旋 1 min, 使样品充分分散均匀, 旋紧盖子, 置于 85 ℃±5 ℃恒温干燥箱, 每隔 0.5 h 取出振摇一次, 提取 3 h, 冷却后, 用水定容至 50 mL, 4000 r/min 离心 10 min, 吸取上层清液用 0.45 μm 过滤膜过滤后, 备用; 因藻类中碘元素含量比较高, 如需稀释需用 0.5% TMAH 作为稀释液进行稀释。

1.3.4　无机砷测定前处理

称取湿藻类试样约 1.0 g, 干藻类试样约 0.4 g 于 50 mL 聚丙烯离心管中, 加入 20 mL 0.15 mol/L 硝酸-0.45%过氧化氢混合溶液, 涡旋混匀, 于 90 ℃恒温箱中热浸提 2.5 h, 每隔 0.5 h 振摇一次, 提取完毕, 取出冷却至室温, 8000 r/min 离心 15 min, 吸取上层清液, 经 0.45 μm 滤膜过滤, 备用。

1.4　样品的测定

1.4.1　多元素及碘的测定

处理后的样品用 ICP-MS 进行多元素及碘的测定。仪器经过调谐后, 其灵敏度、氧化物、分辨率、双电荷等指标符合检测要求, 即可上机检测。碘元素样品前处理过程使用氢氟酸, 在消化液中有氢氟酸的残留, 因此需使用耐氢氟酸的雾化器、中心管; 并且碘元素在仪器管道内残留水平较高, 在实验前应先使用稀释液对进样系统进行清洗。样品检测仪器条件如表 1 所示。

表 1　ICP-MS 仪器条件

Table 1　Instrument conditions of ICP-MS

采样深度/mm	泵速/(r/s)	雾化气流速/(L/min)	辅助气流速/(L/min)	冷却气流速/(L/min)	射频功率/W
5	40	0.985	0.8	14	1550

1.4.2　无机砷的测定

样品提取完成后, 用液相色谱-串联电感耦合等离子体质谱法(high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry, HPLC-ICP-MS)进行测定。选用色谱柱: Thermo Dionex Ionpac As7 阴离子交换色谱柱(250 mm×4 mm, 10 μm)和 Hamilton PRP-X100 预处理柱(20 mm×2.1 mm, 10 μm); 采用梯度洗脱的方式, 流动相分别为 pH 8.4 的 10 mmol/L 磷酸氢二铵+1%甲醇(流动相 B)和 20 mmol/L 磷酸氢二铵+1%甲醇(流动相 C); 进样体积为 25 μL; 待基线平稳, 灵敏度、氧化物、分辨率、双电荷等指标符合检测要求, 即可上机检测。样品检测梯度洗脱程序如表 2 所示。

表 2　梯度洗脱程序

Table 2　Gradient elution protocol

时间/min	流速/(mL/min)	B/%	C/%
0.00	1.0	100	0
4.99	1.0	100	0
5.00	1.2	0	100
10.99	1.2	0	100
11.00	1.0	100	0
15.00	1.0	100	0

1.5　藻类及其制品中重金属污染评价标准与方法

1.5.1　评价标准

根据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 GB 19643—2016《食品安全国家标准 藻类及其制品》等标准, 采用单因子污染指数(P_i)评价和内梅罗综合因子污染指数($P_{综}$)评价两种评价方法[13–15]对藻类及其制品中重金属污染程度进行评估。

1.5.2　评价方法

采用 P_i 和 $P_{综}$ 两种方法对藻类及其制品中一种元素污染状况和多元素总体污染状况分别评价[16–17]。P_i 评价计算公式如(1)所示。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为污染物 i 的单因子污染指数; C_i 为污染物 i 的实际测量浓度, mg/kg, S_i 为污染物 i 的评价标准值,

mg/kg。当 P_i≤0.7 时，评价等级为I级，污染程度为安全；0.7≤P_i≤1.0，评价等级为II级，污染程度需警戒；1.0≤P_i≤2.0，评价等级为III级，为轻度污染；2.0≤P_i≤3.0，评价等级为IV级，污染程度为中度污染；P_i>3.0，评价等级为V级，污染程度为重度污染，随着 P 的增大，污染程度越高，污染越严重。$P_{综}$评价计算公式如(2)所示。

$$P_{综}=\sqrt{\frac{P_{ave}{}^2+P_{max}{}^2}{2}} \tag{2}$$

式中：P_{ave}为 P_i的平均值，P_{max}为 P_i的最大值。$P_{综}$可兼顾各类污染物的贡献权重，在衡量藻类及其制品整体污染状况的同时，突出单因子污染较高的元素对生物的主导影响。当 P_i≤0.7 时，表示无污染，污染水平为清洁；0.7≤P_i≤1.0，藻类样品受到轻微影响，污染水平为比较清洁；1.0≤P_i≤2.0，藻类样品开始受到污染；2.0≤P_i≤3.0，藻类样品受到中度污染；P_i>3.0，藻类样品为重度污染。

1.6 暴露量评估

本研究依据联合国粮农组织/世界卫生组织食物添加剂联合专家委员会(Expert Committee on Food Additives, JECFA)对于水产品中有害重金属的每周可耐受摄入量(provisional tolerated weekly intake, PTWI)为参考标准，通过公式(3)计算出个体日暴露量的平均量及最高量，计算出一周的暴露量并与 PTWI 进行比较，根据摄入量占 PTWI 的百分比，对藻类及其制品的暴露量进行评估。居民藻类食品占总膳食贡献率约为 0.6%，当比值小于 0.6%，表明没有明显的食用风险；当比值大于 0.6%，表明具有一定的食用风险。暴露量计算公式如(3)所示。

$$\mathrm{CDI}=\frac{C\times \mathrm{IR}}{\mathrm{BW}} \tag{3}$$

式中：CDI 为因使用藻类及其制品导致重金属 i 的个体日暴露量(chronic daily intake)，μg/(kg•d)；C 为藻类及其制品中重金属 i 的浓度，mg/kg；IR 为藻类日均摄入量(daily intake rates)，g/d；依据 2022 年我国藻类人均消费量(鲜重)为 5.48 kg/y[18]，日均鲜藻类摄入量为 15 g/d；藻类干重比为 20%[19]，因此干制藻类消费量为 1.096 kg/y，日均干制藻类摄入量为 3 g/d，BW 为人群的平均体重(body weight)，64.3 kg[20]。

1.7 暴露评估方法

1.7.1 健康风险评估

本研究采用美国环保署(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)发布的 THQ 和 TTHQ 评估通过藻类及其制品摄入的重金属导致的非致癌健康风险评估，其计算公式如(4)、(5)所示。

$$\mathrm{THQ}=\frac{\mathrm{CDI}}{\mathrm{RfD}} \tag{4}$$

$$\mathrm{TTHQ}=\sum \mathrm{THQ}_i \tag{5}$$

式中：CDI 为因使用藻类导致重金属 i 的个体日暴露量(chronic daily intake)，μg/(kg•d)；TTHQ 为多种重金属作用的总危险系数；RfD 为重金属的参比剂量(oral reference dose)，mg/(kg•d)，是衡量非致癌物质对人体急慢性系统危害的剂量阈值，系空气、水、土壤及食品等环境介质中化学物质的日均接触剂量估算值。对于涵盖敏感亚群的全人群，终生暴露于该剂量水平的化学物质时，其非致癌、非致突变有害效应的发生风险可降低至无法被检出的水平。依据美国环保署(U.S. Environmental ProtectionAgency, USEPA)发布的参比剂量[21]，Cd 为 0.003 mg/(kg•d)、Pb 为 0.0035 mg/(kg•d)、Hg 为 0.0003 mg/(kg•d)、As 为 0.0003 mg/(kg•d)、Cr 为 0.001 mg/(kg•d)、Zn 为 0.3 mg/(kg•d)、Cu 为 0.4 mg/(kg•d)、Ni 为 0.02 mg/(kg•d)、无机砷 1.5 mg/(kg•d)、Al 为 1.0 mg/(kg•d)、Mn 为 0.14 mg/(kg•d)、Ba 为 0.2 mg/(kg•d)、B 为 0.2 mg/(kg•d)。

当 THQ/TTHQ<1.0 时，表明对人体健康影响较小或者没有影响；THQ/TTHQ≥1.0 时，表明对人体健康有显著影响，长期摄入对人体具有潜在健康风险。

1.7.2 致癌风险评估

结合暴露量和致癌斜率因子计算致癌风险，其计算见公式如(6)所示。

$$R_i=\mathrm{CDI}\times \mathrm{CSF}_0 \tag{6}$$

式中：R_i代表化学物质 i 对个人造成的致癌风险；CSF_0为致癌斜率因子(oral carcinogenic slopefactor)[22]，依据 USEPA 和美国环保局综合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS)发布的各元素的致癌斜率因子[23–24]分别为：无机砷 1.5 [mg/(kg•d)]$^{-1}$；Cd 0.38 [mg/(kg•d)]$^{-1}$；Cr 0.012 [mg/(kg•d)]$^{-1}$；Ni 0.84 [mg/(kg•d)]$^{-1}$[25]。一般认为，R_i>1×10^{-4} 时，化学物质 i 对人体有较高致癌风险；1×10^{-6}<R_i<1×10^{-4}，化学物质 i 对人体存在潜在风险；R_i<1×10^{-6}，化学物质 i 对人体无致癌风险或风险较低[26]。

1.7.3 消费量建议

由于通过调控单日食用分量与月度食用频次，能够切实降低因重金属蓄积引发的致癌风险，因此藻类食品的消费建议可通过每日最大允许消费量 CR_{lim}，单位 kg/d，和每月最大允许餐数 CR_{mm}评价，计算公式如(7)、(8)所示。

$$\mathrm{CRlim}=\frac{\mathrm{ARL}\times \mathrm{BW}}{\sum_{i=1}^{x} C_i\times \mathrm{CSF}} \tag{7}$$

$$\mathrm{CRmm}=\frac{\mathrm{CRlim}\times T_{ap}}{\mathrm{MS}} \tag{8}$$

式中：ARL 为最高可接受终身致癌风险(maximum acceptable lifetime carcinogenic risk)，取值 10^{-4}；C_i为藻类中重金属 i 的浓度，mg/kg；T_{ap}为每月平均天数(average number of days per month)，取值 30.42 d；根据相关报告，MS 为每餐食物摄入量(daily food intake per meal)，取成人 0.174 kg，儿童 0.170 kg[27–28]；BW 为人群的平均体重(body weight)，64.3 kg[20]。

1.8　数据处理

按照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)食品污染监测数据处理指南中推荐, 当样品中污染物未检出率均小于 60%, 未检出数据用 1/2 检出限(limit of detection, LOD)进行统计; 当检出率大于 60%, 未检出数据用 LOD 进行统计[29]。本研究利用 Excel 2021、R 软件(4.5.2)、Rtools 软件(4.5)和 Rstudio 软件(4.4.3)软件进行数据计算统计。

2　结果与分析

2.1　质量控制

27 种元素及无机砷的线性方程的决定系数 r^2 在 0.9990~1.000 之间, 线性良好; LOD 与国家标准方法一致; 为保证检测方法的可靠性, 在检测过程中, 随样品进行了质控物质(GBW10023、GBW10025)和样品加标回收检测, 加标回收率在 95.6%~115.7%, 平行样品相对标准偏差在(relative standard deviation, RSDs)在 3.36%~9.83%之间。质控结果均在范围内, 见表 3。

2.2　藻类及其制品中各元素含量情况

本研究对 27 种元素和无机砷进行检测分析, 其中 Sn 检出率最低为 72.9%, Rb 的检出率为 89.6%, 无机砷、Mo 和 Sb 检出率为 97.9%, 剩余 22 种元素均全部检出; 依据 GB 2762—2022, 共有 7 份样品超过铅的限量值, 超标率为 14.6%。市售藻类及其制品中各元素的平均值、*P*50、*P*95 和最大值见表 4, 从结果可以看出, 3 种藻类中总砷含量均很高, 因此本研究进一步对无机砷进行测定, 其中总砷中绝大部分是没有毒性的砷甜菜碱, 而毒性较强的无机砷检出值很低; 海带中 B 和 I 均远高于其他藻类, 其中干海带(计算失水率后)中 I 高达 7628 mg /kg, 高于紫菜和裙带菜 15~30 倍; 紫菜中 Mn、Fe、Ni、Cu 的含量最高, Ni、Cu 的最大含量为 24.0 mg/kg 和 41.7 mg/kg, 而紫菜中的 Na 含量最低, 约是其他藻类的 1/8; 裙带菜中 Al、K、Rb 的含量均为最低, Ca 和 Sr 的含量最高, 尤其 Ca 的含量高于紫菜和海带的两倍。

2.3　藻类中金属多元素含量的统计学分析

本研究以 28 种元素(含无机砷)的含量为指标, 通过 RStudio 软件进行了皮尔逊相关系数分析, 并通过热图可视化呈现(图 1)。如图 1 所示, 相关性热图进一步揭示了元素间的关联模式: Fe、Co、Ni、As、无机砷、Se、Rb、V 等元素呈现显著正相关, 协同作用强; 而 Na 与多数元素呈负相关, Sr 与 Mo、Cd、Sn 等元素也存在明显负相关, 反映了不同元素在藻类中的竞争吸收或代谢差异。

采用 RStudio 对海带、紫菜和裙带菜进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 从图 2 可以看出前两个主成分(PC1、PC2)累计解释了 59.59%的总变异(PC1:40.57%, PC2:19.02%)。PCA 得分图显示, 海带与紫菜样品存在显著性差异, 其中紫菜样品的数据点分布集中、椭圆紧凑, 显示组内元素含量特征一致性较高; 裙带菜与海带样本呈现高度重叠的分布特征, 说明两组样本无明显差异, 仅通过前两个主成分难以实现有效区分。

2.4　藻类及其制品中各元素污染指数评价

目前我国现行的 GB 2762—2022 中仅对藻类及其制品中 Pb 做出了限定要求, 即新鲜藻类小于等于 0.5 mg/kg、藻类制品小于等于 1.0 mg/kg, 但从结果可看出其他元素含量依旧很高, 存在污染风险, 查询以往其他相关规定及标准, Cr、无机砷限量标准值以 GB 2762—2022 中规定的水产动物的限量标准 Cr 含量小于等于 2.0 mg/kg、无机砷含量小于等于 0.5 mg/kg 为参考, Cu 限量标准以 NY 5073—2006《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》规定的 Cu 含量小于等于 50.0 mg/kg, Al 限量标准 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定的 Al 含量小于等于 100 mg/kg。本研究对 50 份藻类及其制品进行污染指数评价, 3 种藻类中 5 种元素的污染状况如表 5 所示。紫菜中 Cr 的 P_i 最高为 1.880, 评价等级为III级, 为轻度污染, 其次是干海带中 Cr 的 P_i, 评价等级为II级, 污染程度需警戒, 造成这种情况的原因可能是自然环境岩石中天然铬进入水域, 沿岸工业废水排放及大气沉降带来的外源铬, 加之农田污染、养殖化学品不当使用进一步提升水体铬含量, 并且藻类具有较强的吸附与富集能力, 最终造成藻类体内铬不断累积。$P_{综}$ 紫菜最高为 1.410, 达到轻度污染, 干海带 $P_{综}$ 为 0.768, 达到警戒值, 两者均需持续关注。

表 3　藻类质控物质测定结果(mg/kg, *n*=3)

Table 3　Determination results of algal quality control substances (mg/kg, *n*=3)

元素	测定值	标准认定值	元素	测定值	标准认定值
Sr	34.993	36.00 (34.00~38.00)	Li	2.341	2.360 (2.210~2.510)
V	3.937	4.20 (3.60~4.80)	B	14.408	14.500 (13.500~15.500)
Cr	1.420	1.50 (1.37~1.63)	Mg	4095.916	4.000×10^3 (3.900×10^3~4.100×10^3)
Rb	10.456	10.40 (9.70~11.10)	Al	4471.897	4.900×10^3 (4.100×10^3~5.700×10^3)
Cd	0.589	0.57 (0.52~0.62)	Ca	1563.373	1.530×10^3 (1.350×10^3~1.710×10^3)
Pb	2.087	2.05 (1.90~2.20)	Co	0.665	0.630 (0.580~0.680)

表 3(续)

元素	测定值	标准认定值	元素	测定值	标准认定值
Mn	65.927	68.00 (65.00~71.00)	Ni	2.212	2.300 (2.170~2.430)
Fe	1447.850	1.45×10^3 (1.35×10^3~1.55×10^3)	Cu	7.164	7.700 (7.100~8.300)
Ba	9.934	10.40 (8.90~11.90)	Zn	26.730	28.000 (26.000~30.000)
K	14599.788	1.41×10^4 (1.36×10^4~1.46×10^4)	Na	15763.466	1.550×10^4 (1.490×10^4~1.610×10^4)
As	28.928	27.00 (21.00~33.00)	Sb	0.083	0.083 (0.062~0.104)
Mo	0.766	0.78 (0.69~0.87)	Hg	0.015	0.016 (0.012~0.020)

表 4 河北省市售藻类及其制品中多元素含量情况(mg/kg)

Table 4 Multielement content in algae and their products sold in Hebei Province (mg/kg)

元素	海带				紫菜				裙带菜			
	平均值	*P*50	*P*95	最大值	平均值	*P*50	*P*95	最大值	平均值	*P*50	*P*95	最大值
Li	0.336	0.170	0.846	1.070	0.427	0.244	1.250	1.250	0.476	0.331	1.160	1.160
B	6.290E+01	1.070E+01	2.020E+02	2.260E+02	4.720E+00	3.850E+00	7.940E+00	8.160E+00	1.860E+01	1.360E+01	4.280E+01	4.450E+01
Na	4.778E+04	3.584E+04	7.979E+04	2.580E+05	6.300E+03	2.932E+03	2.195E+04	3.990E+04	5.585E+04	5.793E+04	1.153E+05	1.170E+05
Mg	1.735E+03	9.030E+02	4.489E+03	5.329E+03	2.659E+03	2.693E+03	3.773E+03	4.280E+03	3.291E+03	2.729E+03	1.012E+04	1.263E+04
Al	3.910E+02	7.740E+00	6.790E+02	2.029E+03	4.910E+02	4.330E+02	1.111E+03	1.544E+03	1.540E+02	1.060E+02	4.560E+02	4.910E+02
K	3.854E+04	2.140E+03	1.282E+05	1.658E+05	2.204E+04	2.392E+04	2.746E+04	2.853E+04	3.040E+03	3.554E+03	6.643E+03	6.673E+03
Ca	4.766E+03	2.048E+03	1.110E+04	1.154E+04	4.754E+03	4.687E+03	6.675E+03	7.855E+03	1.052E+04	1.430E+04	2.262E+04	2.549E+04
V	1.240	0.097	4.820	6.320	1.220	0.861	2.560	3.160	0.341	0.223	0.944	0.988
Cr	1.410	0.031	3.920	1.930E+01	3.760	0.714	1.790E+01	3.420E+01	0.351	0.190	1.060	1.150
Mn	2.310E+01	5.84	6.760E+01	2.530E+02	6.680E+01	4.050E+01	1.590E+02	2.150E+02	1.760E+01	1.800E+01	4.150E+01	4.970E+01
Fe	1.920E+02	8.95	1.038E+03	1.172E+03	3.220E+02	2.680E+02	8.200E+02	1.039E+03	1.560E+02	9.440E+01	4.650E+02	5.090E+02
Co	0.134	0.010	0.580	1.030	0.305	0.238	0.651	0.779	0.127	0.138	0.303	0.353
Ni	0.267	0.051	0.978	1.650	3.530	1.120	1.410E+01	2.400E+01	0.772	0.663	2.070	2.430
Cu	1.410	0.125	7.010	1.680E+01	2.020E+01	1.610E+01	3.580E+01	4.170E+01	1.180	1.040	3.180	3.710
Zn	1.380E+01	6.72	5.420E+01	1.230E+02	3.040E+01	2.890E+01	4.310E+01	4.780E+01	3.620E+01	3.680E+01	9.150E+01	1.090E+02
As	1.790E+01	3.88	5.530E+01	5.800E+01	3.390E+01	3.410E+01	4.040E+01	4.080E+01	2.010E+01	2.990E+01	3.710E+01	3.740E+01
无机砷	0.157	0.051	0.477	0.727	0.286	0.261	0.530	0.592	0.101	0.065	0.275	0.333
Se	0.081	0.012	0.283	0.720	0.640	0.188	2.690	4.860	0.106	0.127	0.234	0.251
Rb	1.480E+01	0.877	5.330E+01	5.570E+01	1.090E+01	4.510	4.000E+01	4.860	0.577	0.667	1.200	1.200
Sr	1.878E+02	9.340E+01	4.120E+02	4.550E+02	4.370E+01	4.590E+01	5.760E+01	5.790E+01	6.530E+02	8.810E+02	1.353E+03	1.449E+03
Mo	0.054	0.006	0.166	0.179	1.000	0.565	3.247	5.830	0.069	0.073	0.164	0.179
Cd	0.163	0.041	0.887	1.030	3.850	3.880	6.400	6.790	1.450	1.610	3.290	3.780
Sn	0.026	0.009	0.102	0.157	0.055	0.057	0.089	0.090	0.210	0.009	1.090	1.780
Sb	0.014	0.006	0.037	0.054	0.043	0.012	0.188	0.351	0.026	0.022	0.068	0.076
Ba	1.100E+01	3.48	3.800E+01	8.940E+01	1.740E+01	1.050E+01	4.410E+01	5.900E+01	3.740E+01	4.230E+01	8.940E+01	9.680E+01
Pb	0.340	0.088	1.510	1.740	0.472	0.413	0.821	0.971	0.720	0.885	1.541	1.650
Hg	0.011	0.003	0.034	0.037	0.006	0.006	0.007	0.007	0.010	0.014	0.021	0.021
I	1.999E+03	9.980E+01	4.710E+03	7.628E+03	1.350E+02	1.190E+02	2.200E+02	2.540E+02	1.890E+02	1.950E+02	4.200E+02	4.450E+02

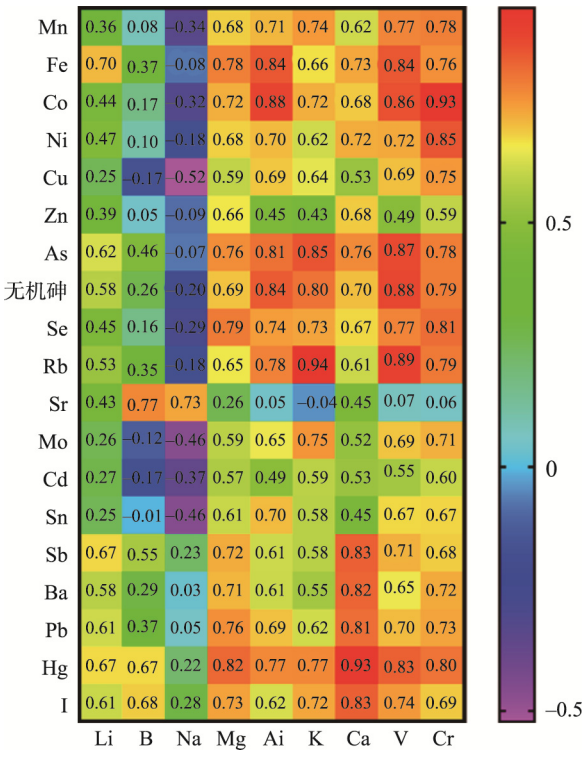
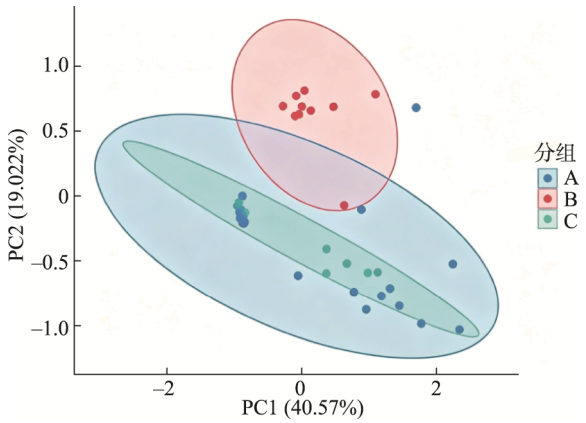


图 1　藻类及其制品中各元素的相关性分析

Fig.1　Correlation analysis of elements in algae and their products



注: A. 海带; B. 紫菜; C. 裙带菜。

图 2　海带、紫菜、裙带菜中各元素的 PCA

Fig.2　PCA of elements in kombu, porphyra and wakame

2.5　藻类及其制品中多元素暴露风险评价

2.5.1　耐受量评价

依据藻类及其制品中不同元素的浓度值，可计算出居民经藻类及其制品摄入多元素暴露量水平，具体见表 6，可看出鲜藻与干藻相比，日摄入量除 Li、Sb、Pb、Hg 鲜藻与干藻值差不多，其余干藻的日摄入量值远高于鲜藻；从元素来看，常量元素 K、Na、Ca、Mg 日摄入量比较高，其中鲜藻中 Na 最高为 8974.558 μg/(kg•d)；干藻中微量元素 I 最高为 106.432 μg/(kg•d)；干藻中有毒有害元素 Al 的值最高为 31.479 μg/(kg•d)，应注意其对人体健康的影响。

由表 6 和表 7 可知，除 Cu、Hg 及鲜藻中的无机砷的摄入量的平均值与 PTWI 比小于 0.6%，其他元素的 CDI/PTWI 均大于 0.6%，超过其安全阈值，需要提起注意；特别是通过干海带摄入 Al 的最大含量与 PTWI 比值达到 33.1%，通过干紫菜摄入 Cd 最大含量与 PTWI 比值达到 31.7%，因此需要在日常生活中控制摄入干海带和干紫菜的量来控制 Al 和 Cd 的暴露量，并采取相关措施控制藻类中 Al 和 Cd 含量，以确保藻类的安全性。

2.5.2　健康风险评估分析

通过不同藻类摄入量、体重、CDI 值进行计算，对各元素进行健康风险评价，见表 8。从数据上可以看出，各元素干藻的 THQ 普遍高于湿藻的 THQ；3 种藻类中 As 的 THQ 均非常高，但是总砷中无机砷为有害部分，所以将无机砷的 THQ 参与到 TTHQ 的计算及评价。从单一元素的健康风险来看，除 As 外各元素的 THQ 均远小于 1，说明基于日常饮食的摄入水平，市售的藻类及其制品中 12 种元素不会产生明显的非致癌性健康风险。从 TTHQ 来看，3 种干制藻类由高到低依次为紫菜>裙带菜>海带，并且 TTHQ 均小于 1，表明对人体健康无显著影响，长期摄入对人体没有潜在健康风险。

2.5.3　致癌风险评估分析

通过公式(6)可计算出居民经藻类摄入的一类致癌物 Cd、无机砷、Ni 和 Cr 的致癌因子，干藻各元素的致癌因子均高于鲜藻，鲜藻中 4 种元素由高到低依次为 $R_{\text{无机砷}}>R_{\text{Ni}}>R_{\text{Cd}}>R_{\text{Cr}}$，干藻中 4 种元素由高到低依次为 $R_{\text{Ni}}>R_{\text{Cd}}>R_{\text{无机砷}}>R_{\text{Cr}}$；除鲜藻中的 R_{Cr} 小于 1×10^{-6}，对人体无致癌风险，其余干湿藻类

表 5　3 种藻类中 5 种元素污染状况

Table 5　Pollution status of 5 kinds of elements in 3 kinds of algae

种类	P_i					$P_{综}$	污染程度
	Cu	无机砷	Pb	Al	Cr		
新鲜海带	0.028	0.314	0.158	0.391	0.705	0.547	安全
干海带			0.079			0.768	警戒
紫菜	0.404	0.572	0.047	0.491	1.880	1.410	轻度污染
新鲜裙带菜	0.024	0.202	0.250	0.154	0.176	0.297	安全
干裙带菜			0.120			0.243	安全

表 6 河北省居民经藻类及其制品摄入多元素暴露量水平[μg/(kg•d)]

Table 6 Multielement exposure levels from algal and algal product intake in residents of Hebei Province [μg/(kg•d)]

元素	CDI		元素	CDI		元素	CDI		元素	CDI	
	鲜藻	干藻		鲜藻	干藻		鲜藻	干藻		鲜藻	干藻
Li	0.025	0.028	V	0.019	0.090	Zn	1.264	1.641	Cd	0.008	0.103
B	1.671	3.358	Cr	0.033	0.145	As	0.711	1.764	Sn	0.002	0.005
Na	8974.558	1967.053	Mn	0.982	2.574	无机砷	0.007	0.014	Sb	0.001	0.002
Mg	132.984	169.006	Fe	2.235	18.151	Se	0.002	0.018	Ba	0.786	1.350
Al	3.241	31.479	Co	0.002	0.014	Rb	0.109	0.967	Pb	0.020	0.034
K	309.876	2411.108	Ni	0.009	0.091	Sr	19.376	17.361	Hg	0.001	0.001
Ca	375.331	437.015	Cu	0.039	0.468	Mo	0.001	0.023	I	15.764	106.432

表 7 河北省居民每周经藻类及其制品摄入多元素暴露量水平及占 PTWI 比

Table 7 Multielement exposure levels and their proportions to PTWI from algae and algal products consumed weekly by residents of Hebei Province

元素	PTWI/(μg/kg/BW)	平均含量/(mg/kg)		周摄入量/(μg/kg)		占 PTWI 比/%		最大含量/(mg/kg)		周最大摄入量/(μg/kg)		占 PTWI 比/%	
		鲜藻	干藻	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻
Al	2000	13.891	674.696	22.684	220.352	1.10	11.0	32.594	2028.961	53.225	662.647	2.7	33.1
Cu	3500	0.168	10.033	0.274	3.277	0.01	0.1	1.693	41.700	2.765	13.619	0.1	0.4
无机砷	15	0.029	0.301	0.047	0.098	0.30	0.7	0.133	0.727	0.217	0.237	1.4	1.6
Cd	7	0.036	2.203	0.058	0.720	0.80	10.3	0.183	6.788	0.299	2.217	4.3	31.7
Pb	25	0.087	0.736	0.143	0.240	0.60	1.0	0.227	1.740	0.371	0.568	1.5	2.3
Hg	5	0.002	0.016	0.004	0.005	0.10	0.1	0.005	0.037	0.008	0.012	0.2	0.2

表 8 藻类及其制品中 13 种元素单一及复合健康风险评估

Table 8 Single and combined health risk assessment of 13 kinds of elements in algae and algal product

元素	海带 THQ		海带 TTHQ		紫菜 THQ	紫菜 TTHQ	裙带菜 THQ		裙带菜 TTHQ	
	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻	干藻	干藻	鲜藻	干藻	鲜藻	干藻
Cd	0.006	0.019			0.179		0.024	0.119		
Pb	0.005	0.011			0.006		0.006	0.016		
Hg	0.002	0.004			0.001		0.002	0.003		
As	2.346	6.781			5.308		3.029	5.235		
Cr	0.013	0.055			0.011		0.002	0.010		
Zn	0.004	0.005			0.005		0.007	0.009		
Cu	0.001	0.004	0.077	0.267	0.022	0.324	0.001	0.002	0.074	0.230
Ni	0.000	0.002			0.003		0.001	0.003		
无机砷	0.025	0.058			0.052		0.011	0.026		
Al	0.002	0.049			0.023		0.003	0.011		
Mn	0.007	0.019			0.017		0.007	0.010		
Ba	0.004	0.006			0.004		0.006	0.015		
B	0.009	0.037			0.001		0.006	0.007		

中 4 种元素的致癌因子均在 1×10^{-6} 与 1×10^{-4} 之间，说明这 4 种元素会对人体存在潜在致癌风险，需纳入关注范畴。

2.5.4　消费量建议结果

从上述致癌风险评估中可看出, 藻类中 4 种致癌物对人群的健康存在潜在致癌风险, 且多元素联合作用与总量蓄积将显著提升致癌概率。因此, 亟需针对藻类及其制品制定优化的居民消费限量标准, 以有效降低经口摄入重金属引发的致癌风险。依据最新的官方调查报告《2010—2013 年中国居民营养与健康状况调查报告》, 成人及儿童平均体重分别为 64.3 kg 和 32 kg[30–32], 通过公式计算成人和儿童青少年 3 种藻类的每日食用限度和每月最大允许餐数, 见表 9。可见, 成人和儿童的藻类每日食用限度应分别降低至 2.03~11.94 g/d 和 1.01~5.94 g/d, 因此, 建议消费者参考表 9 适当控制对这几种藻类及其制品的日食用量和月食用餐数。

表 9　河北省市售藻类及其制品的 CR_{lim} 和 CR_{lim}
Table 9　CR_{lim} and CR_{lim} of commercially available algae and algal products in Hebei Province

	成人		儿童	
	CR_{lim}/g	CR_{mm}/餐	CR_{lim}/g	CR_{mm}/餐
海带	11.94	2	5.94	1
紫菜	2.03	0	1.01	0
裙带菜	4.75	1	2.36	0

3　结论与讨论

本研究分别采用 3 种方法测定藻类及其制品中无机砷、I 及多元素, 方法线性良好, 决定系数 r^2 在 0.9990~1.000 之间; 加标回收率在 95.6%~115.7%, 平行样品 RSDs 在 3.36%~9.83%之间, 检验结果精密度好, 准确度高, 满足检测要求。50 份藻类及其制品中, Sn 检出率最低为 72.9%, Rb 的检出率为 89.6%, 无机砷、Mo 和 Sb 检出率为 97.9%, 剩余 22 种元素均全部检出; 依据 GB 2762—2022, 共有 7 份样品超过铅的限量值, 超标率为 14.6%。

50 份藻类及其制品污染情况相对比较安全, 但紫菜中 Cr 的 P_i 最高为轻度污染, 其次是海带中 Cr 污染程度需警戒; $P_{综}$ 紫菜最高达到轻度污染, 干海带 $P_{综}$ 达到警戒值, 因此还需持续关注。靶标指数 THQ 评估 13 种经口摄入计量的元素, 结果显示除 As 外各元素的 THQ 均远小于 1, 说明基于日常饮食的摄入水平, 市售的藻类及其制品中除 As 外, 12 种元素不会产生明显的非致癌性健康风险。从 TTQH 来看, 3 种干制藻类由高到低依次为紫菜>裙带菜>海带, 并且 TTHQ 均小于 1, 表明对人体健康无显著影响, 长期摄入对人体没有潜在健康风险。值得注意的是, 居民经藻类摄入的一类致癌物 Cd、无机砷、Ni 和 Cr 的致癌因子, 除鲜藻中的 R_{Cr} 小于 1×10^{-6}, 对人体无致癌风险, 其余干湿藻类中 4 种元素的致癌因子均在 1×10^{-6}~1×10^{-4} 之间, 说明这 4 种元素会对人体存在潜在致癌风险, 需纳入关注范畴。因此, 成人和儿童的藻类每日食用限度应分别降低至 2.03~11.94 g/d 和 1.01~5.94 g/d, 建议消费者适当控制对这几种藻类及其制品的日食用量和月食用餐数, 以有效降低经口摄入重金属引发的致癌风险。

本研究尚存在不确定性, 主要体现在以下几方面: (1)暴露时间参数设定采用全年 365 d 的终身暴露评估模型, 该假设可能导致暴露时长与实际情况存在偏差, 进而造成暴露量估算值偏高。(2)受研究区域人群特异性暴露参数数据缺失的限制, 本研究引用全国的平均参数开展分析, 可能引入一定偏差。(3)因缺乏相应的暴露参数, 风险评价范围只覆盖部分污染物, 未纳入其他重金属元素及其他食物品类的暴露剂量, 可能致使居民膳食重金属综合暴露水平被低估。(4)研究未纳入生产、加工等环节中重金属含量的动态变化因素, 同时默认人体对其吸收率为 100%。(5)某些元素不同价态毒性不同, 本研究仅涉及到砷的形态, 其他元素的不同形态未做评价。因此, 评估结果存在不确定性。

目前我国仅在 GB 2762—2022 中对藻类及其制品中的铅做出了限量要求, 其他元素并没有相关规定, 藻类及其制品的监管及安全评估工作缺少科学依据, 制定相关标准已成为保障公众健康的迫切需求。因此有必要持续开展藻类及其制品中各元素的调查工作。对藻类及其制品中多种元素含量进行检测及监测, 能够系统掌握元素污染基线水平与分布特征, 可为食品安全标准制修订、风险预警及膳食风险管理提供坚实的数据支撑与科学参考。

参考文献

[1] 王百川, 傅泽田, 张小栓, 等. ICP-MS 检测海藻类食品中重金属铅[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 311–315.
Wang Baichuan, Fu Zetian, Zhang Xiaoshuan, et al. Determination of lead in the seaweed food by ICP-MS [J]. Food Industry, 2019, 40(10): 311–315.

[2] Rajapakse N, Kim S K. Nutritional and digestive health benefits of seaweed [J]. Advanced Food and Nutrition Research, 2011, 64: 17–28

[3] Jiang Xia, Wang Wenwen, Wang Shuhang, et al. Inieial identification of heavy metals contamination in Taihu lake, a eutrophic lake in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(9): 1539–1548.

[4] 王丕文. 海洋生态毒理学的研究进展[J]. 国外医学: 卫生学分册, 2022, 29(1): 15–19.
Wang Peiwen. Advances in marine ecotoxicology [J]. Foreign Medicine: Health Volume, 2022, 29(1): 15–19.

[5] 黄宏, 王霄, 罗予杉, 等. 大型海藻对重金属富集作用、影响因素及应用[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1158–1167.
Huang Hong, Wang Xiao, Luo Yushan, et al. Enrichment, influ-encing factors and applications of heavy metals by macroalgae [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5): 1158–1167.

[6] Chen Qing, Pan Xiaodong, Huang Baifen, et al. Distribution of metals and metalloids in dried seaweeds and health risk to population in southeastern

China [J]. Scientific Reports, 2018, 8(3578): 1–7.

[7] 张薇, 王晶, 王若燕, 等. 绍兴地区主要食品中硼含量调查及居民膳食暴露初评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(7): 873–876.
Zhang Wei, Wang Jing, Wang Ruoyan, et al. Investigation of boron content in principal food and preliminary assessment of dietary exposure in Shaoxing area [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(7): 873–876.

[8] 程雪华, 曾梦, 林少华. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定紫菜中硒含量[J]. 蔬菜, 2022, 8(4): 60–63.
Cheng Xuehua, Zeng Meng, Lin Shaohua. Determination of content of selenium in laver by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. Vegetables, 2022, 8(4): 60–63.

[9] 杨玉凤, 李丽丽, 陈建文, 等. 2017—2019 年日照市市售海带中铅、镉、汞、砷、无机砷污染监测分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8318–8322.
Yang Yufeng, Li Lili, Chen Jianwen, et al. Monitoring and analysis of lead, cadmium, mercury, arsenic, and inorganic arsenic contamination in commercially available kelp in Rizhao City from 2017 to 2019 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(22): 8318–8322.

[10] 郭琴, 闫兆凤. 2018—2022 年山东省威海市养殖场海产品 金属污染状况调查及健康风险评估[J]. 现代疾病预防控制, 2024, 35(10): 795–800.
Guo Qin, Yan Zhaofeng. Investigation and health risk assessment of metal contamination status in the sea products from aquaculture area in Weihai of Shandong, 2018—2022 [J]. Modern Disease Control and Prevention, 2024, 35(10): 795–800.

[11] 王冰, 吴飞, 王睿, 等. 不同前处理方法对藻类及其制品中铝含量测定的影响及其风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 284–291.
Wang Bing, Wu Fei, Wang Rui, et al. Effects of different pretreatment methods on the determination of aluminum content in algae and algae products and risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 284–291.

[12] 王国玲, 王晓琳, 杨路平, 等. 山东省胶东半岛养殖海带部分元素含量水平分析及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(23): 4397–4402.
Wang Guoling, Wang Xiaolin, Yang Luping, et al. Metal content analysis and health risk assessment of kelp cultured, Jiaodong Peninsula, Shandong Province [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(23): 4397–4402.

[13] 张萌, 张银烽, 赵晓慧, 等. 云南省水生蔬菜中 5 种典型重金属含量特征及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3710–3718.
Zhang Meng, Zhang Yinfeng, Zhao Xiaohui, et al. Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3710–3718.

[14] 郭绍义, 王红新, 盛雪, 等. 升金湖湿地蔬菜重金属污染及健康风险评价[J]. 长春师范大学学报, 2023, 42(8): 113–119.
Guo Shaoyi, Wang Hongxin, Sheng Xue, et al. Evaluation of heavy metal pollution and health risks in wetland vegetables of Shengjin Lake [J]. Journal of Changchun Normal University, 2023, 42(8): 113–119.

[15] 连莹莹, 丁国涛, 方彦飞, 等. 邯郸市 6 种常见蔬菜中农药与重金属残留检验及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 84–92.
Lian Yingying, Ding Guotao, Fang Yanfei, et al. Detection and health risk assessment of pesticides and heavy metal residues in 6 kinds of common vegetables in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 84–92.

[16] 钟映雄, 陈佳佳, 陈观兰, 等. 广东沿海常见水产品中砷含量分析及健康风险评估[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 254–260.
Zhong Yingxiong, Chen Jiajia, Chen Guanlan, et al. Arsenic content analysis and health risk assessment of common aquatic products in Guangdong Province [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 254–260.

[17] 王海鹤, 孙媛媛, 张帅, 等. 贵阳市集中式饮用水源地重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(10): 2039–2047.
Wang Haihe, Sun Yuanyuan, Zhang Shuai, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in drinking water source of Guiyang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 31(10): 2039–2047.

[18] 李雪, 高翔, 赵蕾, 等. 中国居民水产品食用消费量测算与分析[J]. 中国渔业经济, 2024, 42(2): 95–104.
Li Xue, Gao Xiang, Zhao Lei, et al. Estimation and analysis of aquatic product consumption by chinese resident [J]. Chinese Fisheries Economy, 2024, 42(2): 95–104.

[19] 邵桂兰, 刘冰, 李晨. 我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应—基于我国 9 个沿海省份版面数据[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2614–2625.
Shao Guilan, Liu Bing, Li Chen. Evaluation of carbon dioxide capacity and the effects of decomposition and spatio-temporal differentiation of seawater in China 7S main sea area based OD panel data from 9 coastal provinces in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2614–2625.

[20] 中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)[J]. 营养学报, 2020, 42(6): 521.
Report on nutrition and chronic diseases of residents in China (2020) [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2020, 42(6): 521.

[21] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk based screening table composite table summary tab 0615 [Z]. http:/www2.epa.gov/risk/riskbasedscreeningtablegenerictables.2015.

[22] 吴梅, 陈祝军, 陈蓉, 等. 茶叶、袋装茶以及茶粉中 15 种金属及类金属含量及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 98–106.
Wu Mei, Chen Zhujun, Chen Rong, et al. Content of 15 kinds of metal andmetalloid in tea, tea bag and tea powder and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 98–106.

[23] 李海燕, 尹盼盼, 彭腾腾, 等. 甘草中 20 种无机元素的测定及对有害元素的健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 281–291.
Li Haiyan, Yin Panpan, Peng Tengteng, et al. Determination of 20 kinds of inorganic elements in glycyrrhizae radix et rhizoma and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 281–291.

[24] 李昇昇, 李敏, 朱晓辉, 等. 大亚湾海产中重金属的健康风险与海产消

费建议[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 352–361.
Li Shengsheng, Li Min, Zhu Xiaohui, et al. Heavy metals in selected marine organisms from Daya Bay: human health risk assessment and advice for seafood consumption [J]. Environemental Chemistry, 2020, 39(2): 352–361.

[25] 云奋, 叶海湄, 黄涵. 海南省市售苦丁茶和鹧鸪茶及茶汤中9种元素污染特征及健康风险评估[J]. 实用预防医学, 2021, 28(9): 1054–1058.
Yun Fen, Ye Haimei, Huang Han. Pollution characteristics and health risk assessment of nine elements in commercially available Kuding and Partridge tea leaves and their infusions in Hainan Province [J]. Practical Preventive Medicine 2021, 28(9): 1054–1058.

[26] 常越亚, 常磊, 刘艳芝, 等. 不同蔬菜类型中铅、镉、铬、砷富集特征及健康风险评价[J]. 上海农业学报, 2025, 41(1): 66–71
Chang Yueya, Chang Lei, Liu Yanzhi, et al. Characteristics and health risk assessm ent of lead, cadm ium, chromium and arsenic in different vegetable type [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025, 41(1): 66–71.

[27] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 217-259.
Zhao Xiuge, Duan Xiaoli. Manual of exposure parameters for chinese population (Adult) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 217-259.

[28] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群环境暴露行为模式研究报告(儿童卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016: 24-27.
Zhao Xiuge, Duan Xiaoli. Environmental exposure related activity patterns survey of Chinese Population (Children) [M]. China Environmental Science Press, 2016: 24-27.

[29] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中国预防医学杂志, 2002, 36(4): 278–279.
Wang Xuqing, Wu Yongning, Chen Junshi. Food contamination monitoring low-level data processing issues [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.

[30] 孙进健, 侯颖, 董翼飞, 等. 养殖海带和裙带菜元素含量分析、污染评价及健康风险评估[J]. 农产品质量安全, 2025,5: 14–19.
Sun Jinxin, Hou Ying, Dong Yifei, et al. Analysis of elemental composition in kelp and wakame seaweed, pollution assessment, and health risk assessment [J].Agricultural Product Quality and Safety, 2025,5: 14–19.

[31] 朴建华，霍军生. 中国居民营养与健康状况监测报告之二:2010-2013年居民体质与营养状况[M]. 北京：人民卫生出版社, 2019: 54-57.
Pu Jianhua, Huo Junsheng. China resident nutrition and health status monitoring report part II: physical fitness and nutrition status of residents (2010　2013)[M].Beijing: People's Medical Publishing House, 2019: 54-57.

[32] Fang Yanfei, Lian Yingying, Liu Miao, et al. Exposure and risk assessment of heavy metals via food consumption from Handan City, North China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 140: 107287.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)